

**laboratorio central
de ensayo
de materiales
de construcción**

publicación n.º 202

**Método aproximado de cálculo
de presas bóveda**

Avelino Samartín Quiroga
Dr. Ing. de Caminos. Lic. en Ciencias Matemáticas

Román Espinosa Rueda
Ingeniero de Caminos

Depósito Legal: M. 8670/73

Rubio y Castro, S.L. - Matilde Hernández, 75 - Madrid-25

INDICE

Introducción	5
Método de cálculo	5
Limitaciones.....	10
Ejemplos de cálculo. Aproximación de los resultados	10
Tabla 1.....	13
Tabla 2.....	24
Conclusiones	31
Reconocimientos	31
Bibliografía	32
Resumen	33
Résumé	34
Summary	35

Clave para todas
las figuras

- Superficie media
- Paramento Seco
- ▣ Paramento Mojado

1. INTRODUCCION

En el estado actual de la Técnica se puede considerar totalmente finalizado en sus líneas generales el estudio del comportamiento elástico de una presa cimentada en un terreno elástico. A este respecto es instructiva la lectura de [1], en donde se comparan resultados obtenidos por diferentes métodos de cálculo aplicados a dos ejemplos de presas tipo.

En todos los procedimientos de análisis presentados ("Trial load" con ajuste radial o completo, Elementos finitos, Relajación dinámica, Kantorovich, etc.) era imprescindible la utilización de un ordenador electrónico.

El objeto de esta nota es presentar otro método de cálculo que puede ser incluido, en cierto sentido, dentro de los métodos en elementos finitos, y que presenta la ventaja de utilizar programas standard de cálculo de estructuras, prácticamente accesibles en cualquier librería de programas (STRESS en IBM, BAUSTATIK en SIEMENS, etc.) y por lo tanto su costo de explotación es probablemente más reducido (lo que no ocurre con los programas de cálculo utilizados en [1]).

Si bien, la preocupación actual de los métodos de cálculo de presas bóvedas se dirige hacia los aspectos de comportamiento anelástico de la presa, su seguridad a la rotura, interacción presa-valle con su realidad geológica incluida (propiedades de la roca, diaclasas, etc.), el estudio elástico parece todavía necesario a efectos de dimensionamiento o bien simplemente como rutina en un proceso más amplio de un análisis de optimización de presas. Es interesante, en este sentido, ver la publicación [2] que representa una gran aportación al tema.

2. METODO DE CALCULO

El cálculo que se propone utiliza las siguientes fases:

1) Sustitución de la estructura continua de la presa por una estructura entramado espa-

cial, formada por nudos y barras rectas.

- 2) Los nudos se encuentran en la superficie media de la presa (directriz de la lámina).
- 3) Los nudos se suponen suficientemente próximos entre sí para suponer recto el arco de directriz que une cada dos nudos contiguos.
- 4) Las barras se disponen en dos familias ortogonales entre sí:
 - a) Arcos o barras situadas en la misma horizontal.
 - b) Ménsulas o barras perpendiculares a los arcos en los nudos de intersección.

Se procurará que las ménsulas y arcos estén separados a distancias iguales entre sí.
- 5) En cada nudo se conocen los siguientes datos:
 - a) Coordenadas del nudo referidas a un sistema cartesiano trirrectangular general de ejes de referencia $X Y Z$. (ejes globales o generales).
 - b) Cosenos directores de la normal exterior a la superficie media de la presa, en el nudo.
 - c) Espesor de la lámina.
 - d) Ancho de la ménsula.
 - e) Ancho del arco.

Como ancho de la ménsula en el nudo se puede adoptar la semidistancia, medida según la superficie media, entre las dos ménsulas contiguas a la ménsula que pasa por el nudo dado.

Si la ménsula que pasa por el nudo es extrema se determinaría el ancho de la ménsula como la semidistancia a la ménsula contigua.

Análogamente se procedería con los arcos.

- 6) Para cada barra $i-j$ del entramado espacial que une los nudos i y j se deben conocer sus características mecánicas, referidas a unos ejes locales o intrínsecos (u, v, w) de cada barra siendo
 - \bar{u} el eje definido por la recta que une el nudo i con j ($i < j$).
 - \bar{v} el eje dirigido según la normal positiva a la superficie media.
 - \bar{w} definido por el producto vectorial $\bar{w} = \bar{u} \times \bar{v}$

y las características mecánicas son:

- a) A_n área de la sección transversal de la barra.

$$A_n = \frac{1}{2} \left[(e b)_i + (e b)_j \right]$$

- b) $A_v = \frac{A_n}{1,5}$ área efectiva de cortante dirección \bar{v}

- c) $A_w = A_n$ área efectiva de cortante dirección \bar{w}

- d) $I_u = 2I_w$ inercia a torsión, igual a dos veces la inercia a flexión alrededor del eje w , según la teoría de láminas delgadas.

e) I_v Inercia a flexión alrededor del eje v .

$$I_v = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{eb^3}{12} \right)_i + \left(\frac{eb^3}{12} \right)_j \right]$$

f) I_w inercia a flexión alrededor de w .

$$I_w = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{e^3b}{12} \right)_i + \left(\frac{e^3b}{12} \right)_j \right]$$

En las fórmulas anteriores $(e, b)_i$ designan el espesor y ancho de la barra, en el nudo i . Análogamente con respecto al nudo j .

g) β es el ángulo que sirve para identificar la posición de la barra (ejes principales de inercia de la sección \bar{v} y \bar{w}) respecto a los ejes generales.

Se puede definir para el STRESS (*) por la expresión:

$$\cos \beta = \frac{\bar{y} \cdot \bar{v}}{1 - (\bar{y} \cdot \bar{u})^2}$$

siendo

$$\begin{aligned} \beta < 0 & \quad \text{si } \bar{y} \cdot \bar{w} > 0 \\ \beta > 0 & \quad \text{si } \bar{y} \cdot \bar{w} < 0 \end{aligned}$$

7) Cargas

Las cargas deben darse siempre **concentradas en los nudos** del entramado, de tal forma que constituyan un sistema estáticamente equivalente al actuante en la estructura real.

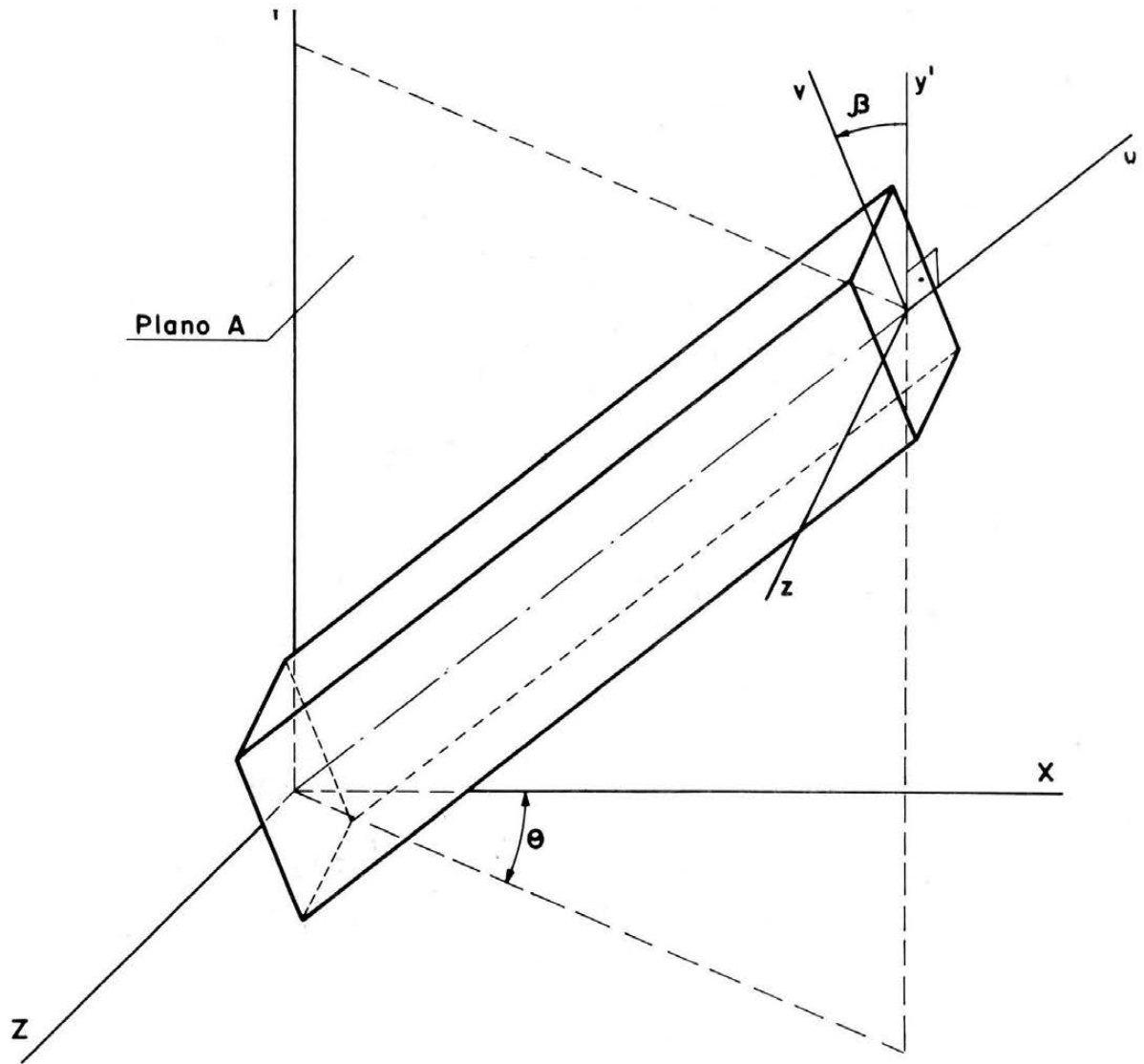
Si se introdujesen las cargas actuando sobre las barras los resultados de los corrimientos en los nudos serían correctos, pero los esfuerzos (y tensiones) en las barras cargadas se verían afectados por los esfuerzos (y tensiones) de empotramiento rígido.

(*) En este proceso de cálculo, el ángulo que define la posición de una barra en el espacio es el siguiente:

Se define el plano A como aquél que contiene el eje local u y a una línea paralela al eje global Y . El eje y' se define como una línea contenida en el plano A y perpendicular al eje u y su dirección tal que la proyección de y' sobre el eje Y sea en el sentido positivo de Y . El ángulo β es el de y' a v con el signo dado por la regla de la mano derecha con relación al eje x .

Si el eje u es paralelo al eje Y , β es el ángulo de $-X$ al eje v , si el eje u tiene el mismo sentido que el Y , o el ángulo de $+X$ al eje y si u tiene sentido opuesto a Y .

El cálculo puede incluir cualquier tipo de carga: peso propio, carga hidrostática, temperatura, cargas concentradas, etc., o cualquier combinación de las mismas.



8) Proceso

El método de cálculo del entramado espacial utiliza procedimientos matriciales de análisis de estructuras, en particular, el método del equilibrio o matriz de rigidez, cuyo desarrollo detallado puede verse en [3].

9) Resultados

En general el cálculo que se comenta produce los siguientes resultados:

- a) Corrimientos de los nudos referidos a ejes generales, es decir

$$d_x, d_y, d_z$$

- b) Giros de los nudos referidos a ejes generales, o sea

$$\theta_x, \theta_y, \theta_z$$

- c) Error en el cierre de las 6 ecuaciones de equilibrio de cada nudo.

- d) Esfuerzos en extremos de barras (acciones actuando sobre las mismas) referidos a ejes locales.

$$F_u, F_v, F_w, M_u, M_v, M_w$$

- e) Reacciones en los apoyos de la estructura.

- f) Tensiones.

En general, tiene el mayor interés en el proyecto, la determinación de tensiones en los dos paramentos de la presa, es decir:

Arcos y ménsulas

Tensiones normales:

$$\text{Aguas arriba } n_{uu} = \frac{F_u}{A_u} - \frac{M_w}{I_w} \frac{e}{2}$$

$$\text{Aguas abajo } n_{uu} = \frac{F_u}{A_u} + \frac{M_w}{I_w} \frac{e}{2}$$

Tensiones tangenciales:

$$\text{Aguas arriba } n_{uv} = \frac{F_w}{A_w} + \frac{M_u}{I_u} \frac{e}{2}$$

$$\text{Aguas abajo } n_{uv} = \frac{F_w}{A_w} - \frac{M_u}{I_u} \frac{e}{2}$$

siendo F_u , F_w , M_u y M_w la media aritmética de los esfuerzos correspondientes en los extremos de las barras, que coinciden con el nudo en estudio, debiendo cambiarse de signo al extremo dorsal de la barra (extremo i supuesto $i < j$).

3. LIMITACIONES

En general el método de cálculo indicado es aplicable a bóvedas delgadas, por lo que los resultados serán menos aproximados cuanto más se aleje de esta hipótesis la presa analizada.

Con respecto al número de nudos del emparrillado equivalente la limitación viene usualmente impuesta por el tamaño del ordenador utilizado. En el caso del IBM-1130 de 32 K del Gabinete de Cálculo del M.O.P. donde se han procesado los ejemplos que se comentan a continuación, el número máximo de nudos viene limitado a 125. En el caso de presas simétricas, puede calcularse solamente la mitad de la presa introduciendo las pertinentes condiciones de simetría en el eje, con lo que se reduce notablemente el número de nudos del emparrillado espacial.

Se tiene en cuenta la influencia de la deformación del terreno, análogamente a otros métodos de cálculo, introduciendo barras adicionales de matriz de rigidez o características mecánicas dadas por las fórmulas de Vogt.

Conviene realizar programas adicionales sencillos de preparación de entrada de datos para el emparrillado y obtención de resultados en tensiones (*) y tensiones principales, adecuados para presas.

La economía de trabajo y la evitación de errores lo hace aconsejable aunque no imprescindible.

Generalmente es necesario, como en todos los métodos de cálculo, la utilización de un programa de definición geométrica de presas.

4. EJEMPLOS DE CALCULO. APROXIMACION DE LOS RESULTADOS

Los dos ejemplos analizados por este método se refieren a las presas tipos 1 y 5 de la publicación [1].

En ella se definen las características geométricas y mecánicas de presas y valle, por lo que se recomienda su consulta.

(*) En algunos programas Standard STRUDL de IBM admite la posibilidad de salida de esfuerzos y tensiones.

Debido a la simetría de ambas presas, para el cálculo se ha tomado solamente la mitad de éstas.

La elección de estos tipos se ha realizado en función a la disponibilidad de elementos de comparación suficientes en relación a otros métodos de cálculo.

Presa tipo 1.—Se trata de una presa de diseño muy elemental. Su forma es la de un cilindro recto de espesor constante de 3 mts. La altura de valle a coronación es 30 mts. Se supone el terreno y los estribos infinitamente rígidos. En la fig. 1 se representa una planta de ésta.

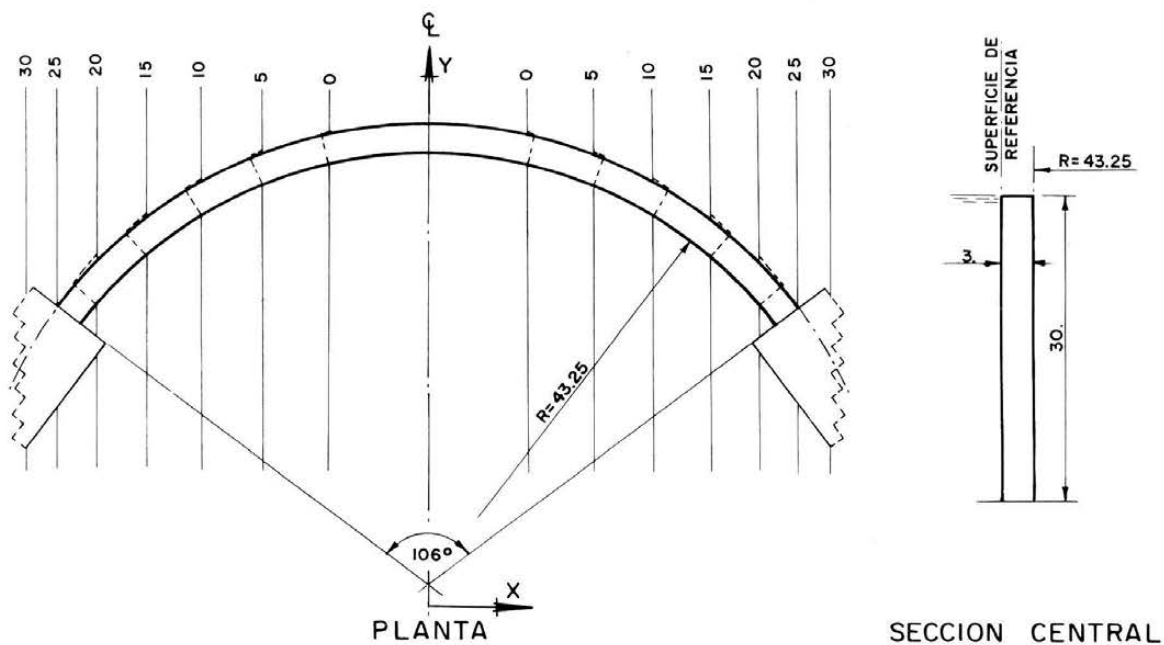


Fig. 1. Presa tipo 1: Planta y sección en ménsula central.

El emparrillado equivalente de cálculo se indica en la fig. 2.

La entrada de datos de descripción del emparrillado ha sido:

N.º nudos = 41

N.º arcos = 7

N.º ménsulas = 8

Coordenadas de los nudos y cosenos directores de la normal exterior (*). Tabla I.

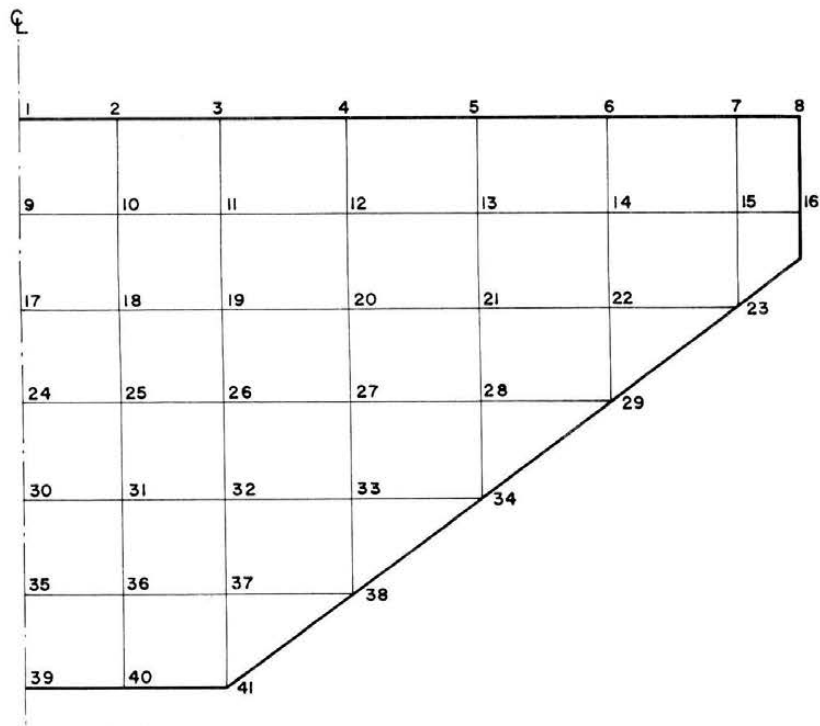


Fig. 2. Presa tipo 1: Emparrillado equivalente de cálculo en desarrollo sobre la superficie de referencia.

(*) Datos obtenidos del programa "Geometría de presas bóveda" elaborado en el Laboratorio Central.

T A B L A 1

Nudo	x	y	z	α	β	γ
1	0.000	44.750	0.000	0.000	1.000	0.000
2	5.000	44.469	0.000	0.111	0.993	0.000
3	10.243	43.562	0.000	0.228	0.973	0.000
4	16.841	41.459	0.000	0.376	0.926	0.000
5	22.985	38.395	0.000	0.513	0.858	0.000
6	28.558	34.452	0.000	0.638	0.769	0.000
7	33.397	29.785	0.000	0.746	0.665	0.000
8	35.489	27.259	0.000	0.793	0.609	0.000
9	0.000	44.750	-5.000	0.000	1.000	0.000
10	5.000	44.469	-5.000	0.111	0.993	0.000
11	10.243	43.562	-5.000	0.228	0.973	0.000
12	16.841	41.459	-5.000	0.376	0.926	0.000
13	22.985	38.395	-5.000	0.513	0.858	0.000
14	28.558	34.452	-5.000	0.638	0.769	0.000
15	33.397	29.785	-5.000	0.746	0.665	0.000
16	35.489	27.259	-5.000	0.793	0.609	0.000
17	0.000	44.750	-10.000	0.000	1.000	0.000
18	5.000	44.469	-10.000	0.111	0.993	0.000
19	10.243	43.562	-10.000	0.228	0.973	0.000
20	16.841	41.459	-10.000	0.376	0.926	0.000
21	22.985	38.395	-10.000	0.513	0.858	0.000
22	28.558	34.452	-10.000	0.638	0.769	0.000
23	33.397	29.785	-10.000	0.746	0.665	0.000
24	0.000	44.750	-15.000	0.000	1.000	0.000
25	5.000	44.469	-15.000	0.111	0.993	0.000
26	10.243	43.562	-15.000	0.228	0.973	0.000
27	16.841	41.459	-15.000	0.376	0.926	0.000
28	22.985	38.395	-15.000	0.513	0.858	0.000
29	28.558	34.452	-15.000	0.638	0.769	0.000
30	0.000	44.750	-20.000	0.000	1.000	0.000
31	5.000	44.469	-20.000	0.111	0.993	0.000
32	10.243	43.562	-20.000	0.228	0.973	0.000
33	16.841	41.459	-20.000	0.376	0.926	0.000
34	22.985	38.395	-20.000	0.513	0.858	0.000
35	0.000	44.750	-25.000	0.000	1.000	0.000
36	5.000	44.469	-25.000	0.111	0.993	0.000
37	10.243	43.562	-25.000	0.228	0.973	0.000
38	16.841	41.459	-25.000	0.376	0.926	0.000
39	0.000	44.750	-30.000	0.000	1.000	0.000
40	5.000	44.469	-30.000	0.111	0.993	0.000
41	10.243	43.562	-30.000	0.228	0.973	0.000

Descripción de los arcos del emparrillado

Arco 1:	Nudos:	1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8
" 2:	" :	9 – 10 – 11 – 12 – 13 – 14 – 15 – 16
" 3:	" :	17 – 18 – 19 – 20 – 21 – 22 – 23
" 4:	" :	24 – 25 – 26 – 27 – 28 – 29
" 5:	" :	30 – 31 – 32 – 33 – 34
" 6:	" :	35 – 36 – 37 – 38
" 7:	" :	39 – 40 – 41

Descripción de las ménsulas del emparrillado

Ménsula 1:	Nudos:	1 – 9 – 17 – 24 – 30 – 35 – 39
" 2:	" :	2 – 10 – 18 – 25 – 31 – 36 – 40
" 3:	" :	3 – 11 – 19 – 26 – 32 – 37 – 41
" 4:	" :	4 – 12 – 20 – 27 – 33 – 38
" 5:	" :	5 – 13 – 21 – 28 – 34
" 6:	" :	6 – 14 – 22 – 29
" 7:	" :	7 – 15 – 23
" 8:	" :	8 – 16

Los resultados de corrimientos y tensiones se representan en las figs. 3 a 8:

Fig. 3.- Se representan los corrimientos radiales de la superficie media en la ménsula central y ménsula media entre la clave y el estribo.

Fig. 4.- Se representan los corrimientos radiales de la superficie media en el arco superior sobre el desarrollo de dicha superficie.

Fig. 5.- Se representan los corrimientos tangenciales de la superficie media y de ambos paramentos en el arco superior.

Fig. 6.- Se representan las tensiones verticales en ambos paramentos de la ménsula central.

Fig. 7.- Se representan las tensiones horizontales o tensiones de arco en ambos paramentos del arco superior.

Fig. 8.- Se representan las tensiones horizontales o tensiones de arco en puntos de ambos paramentos de la ménsula central. Estas tensiones de arco en el pie de la ménsula se han obtenido a partir de las tensiones verticales multiplicando por el módulo de Poisson.

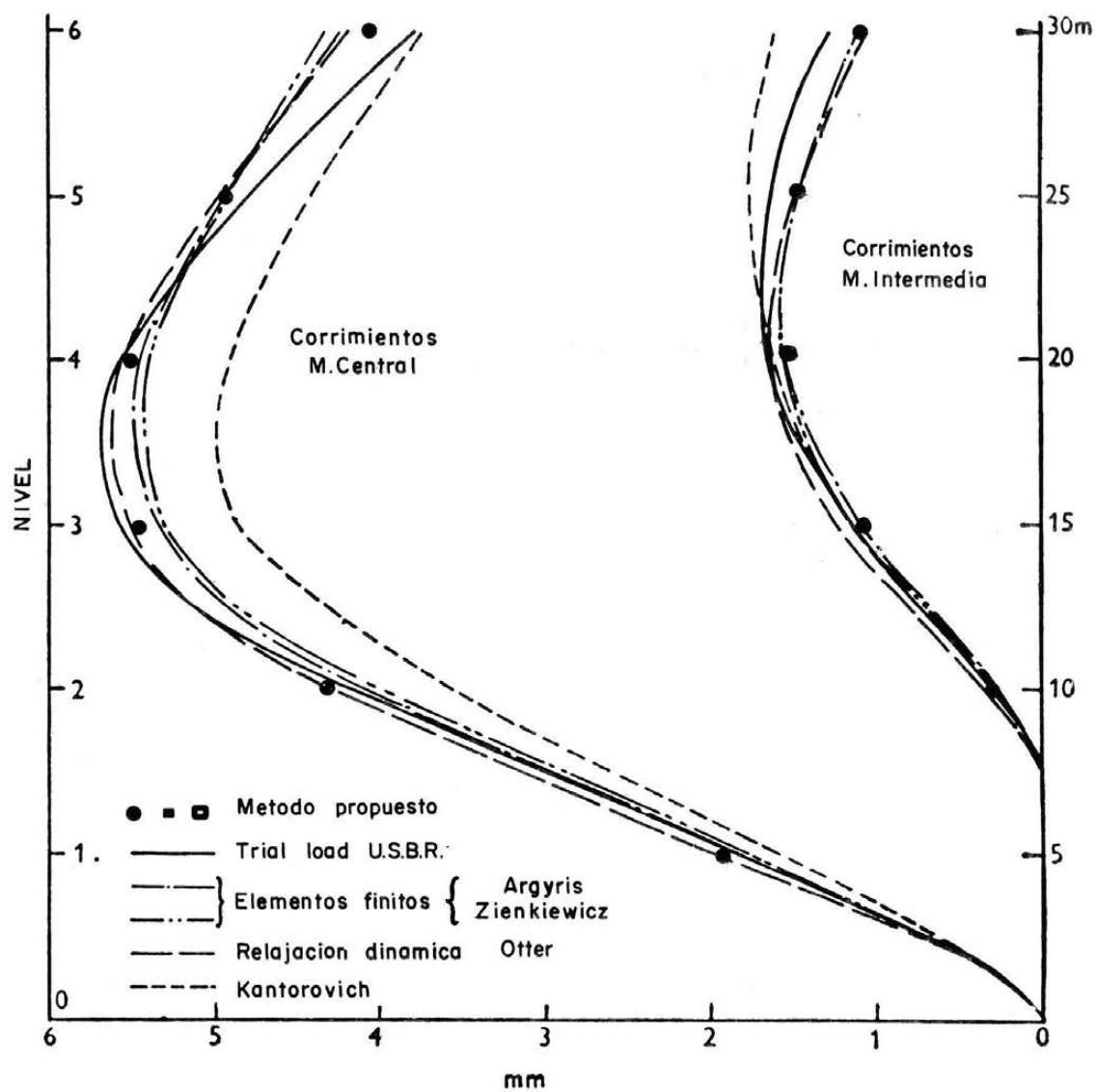


Fig. 3. Presa tipo 1: corrimientos radiales en ménsula central y ménsula intermedia.

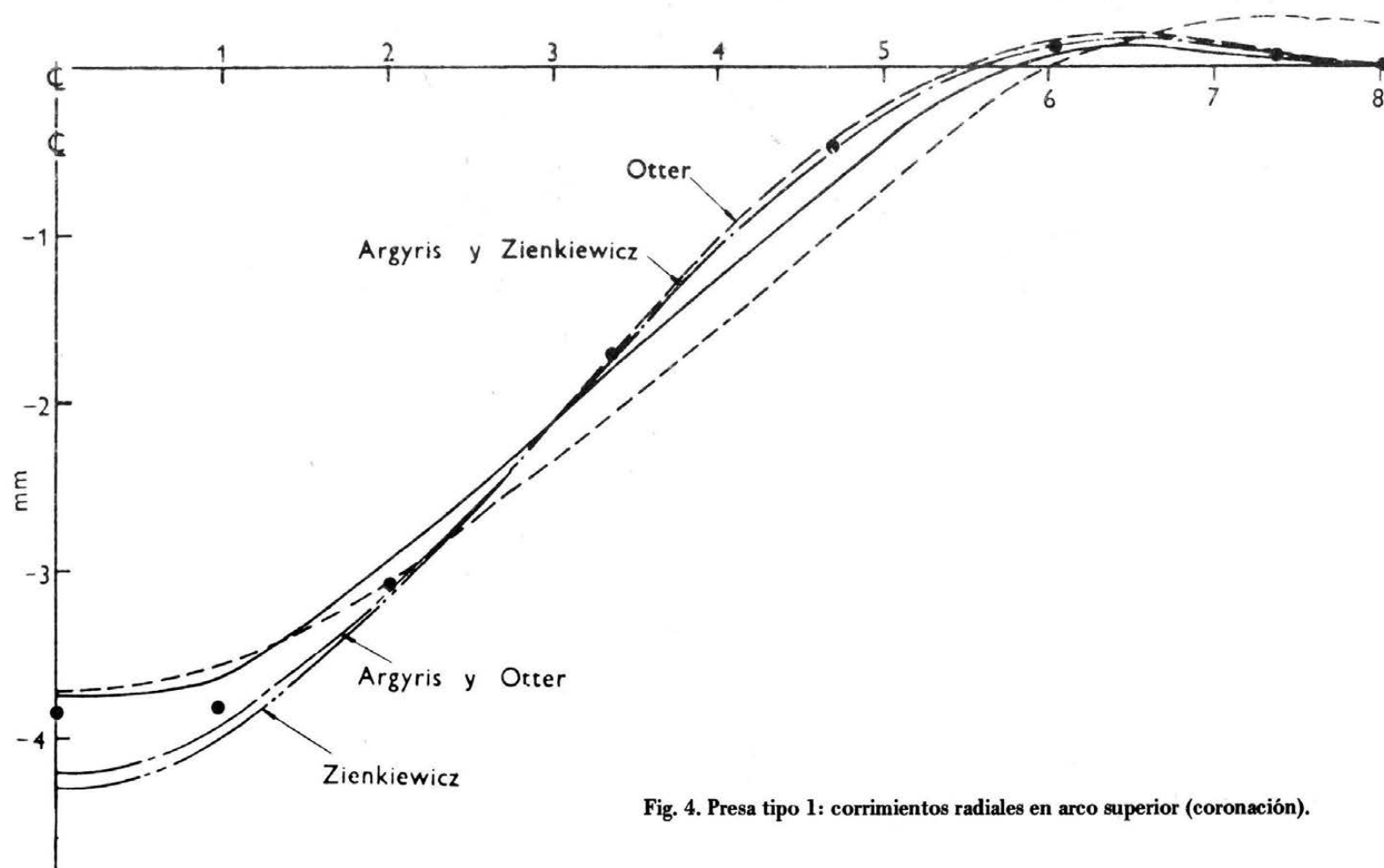


Fig. 4. Presa tipo 1: corrimientos radiales en arco superior (coronación).

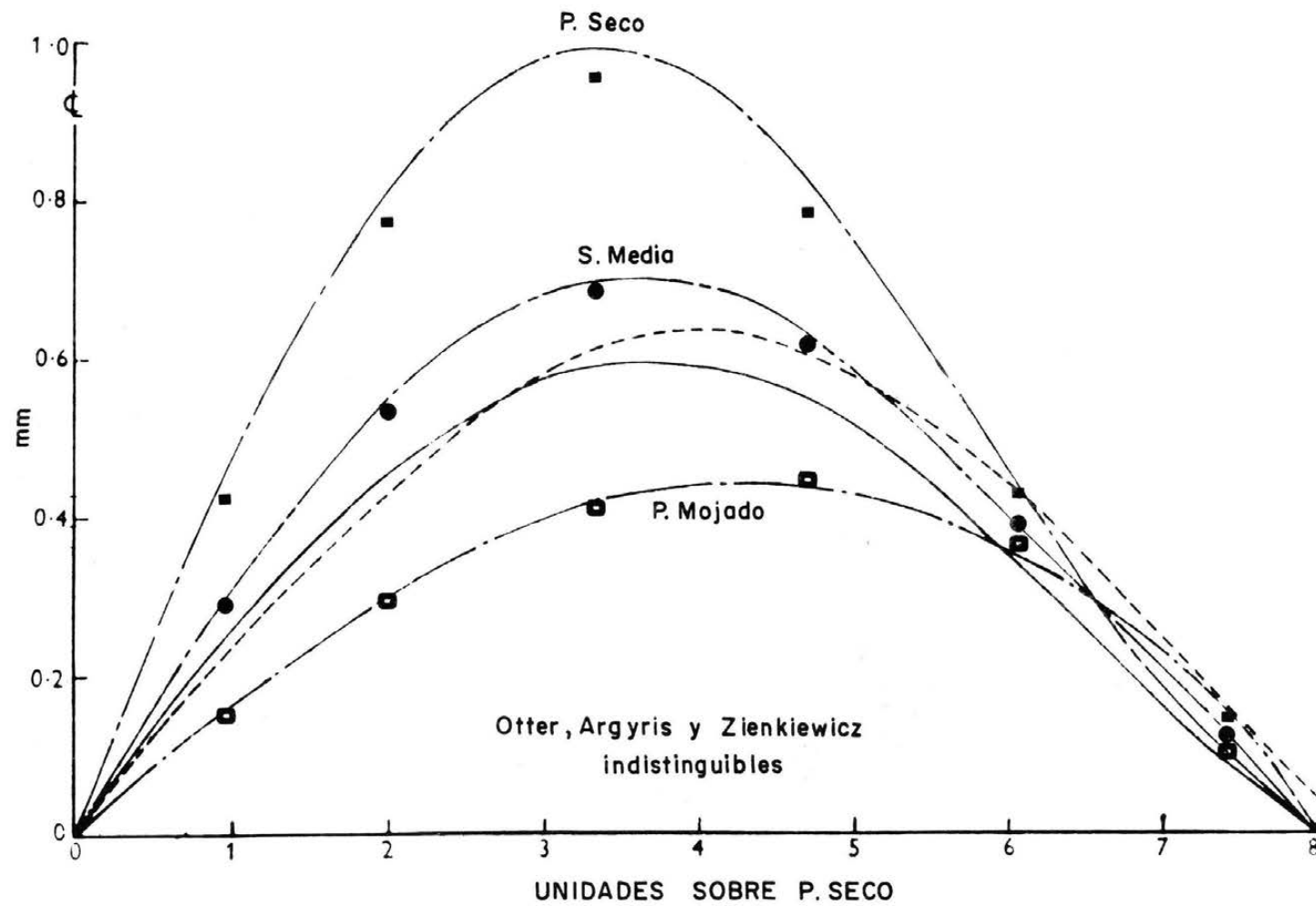


Fig. 5. Presa tipo 1: corrimientos tangenciales en arco superior (coronación).

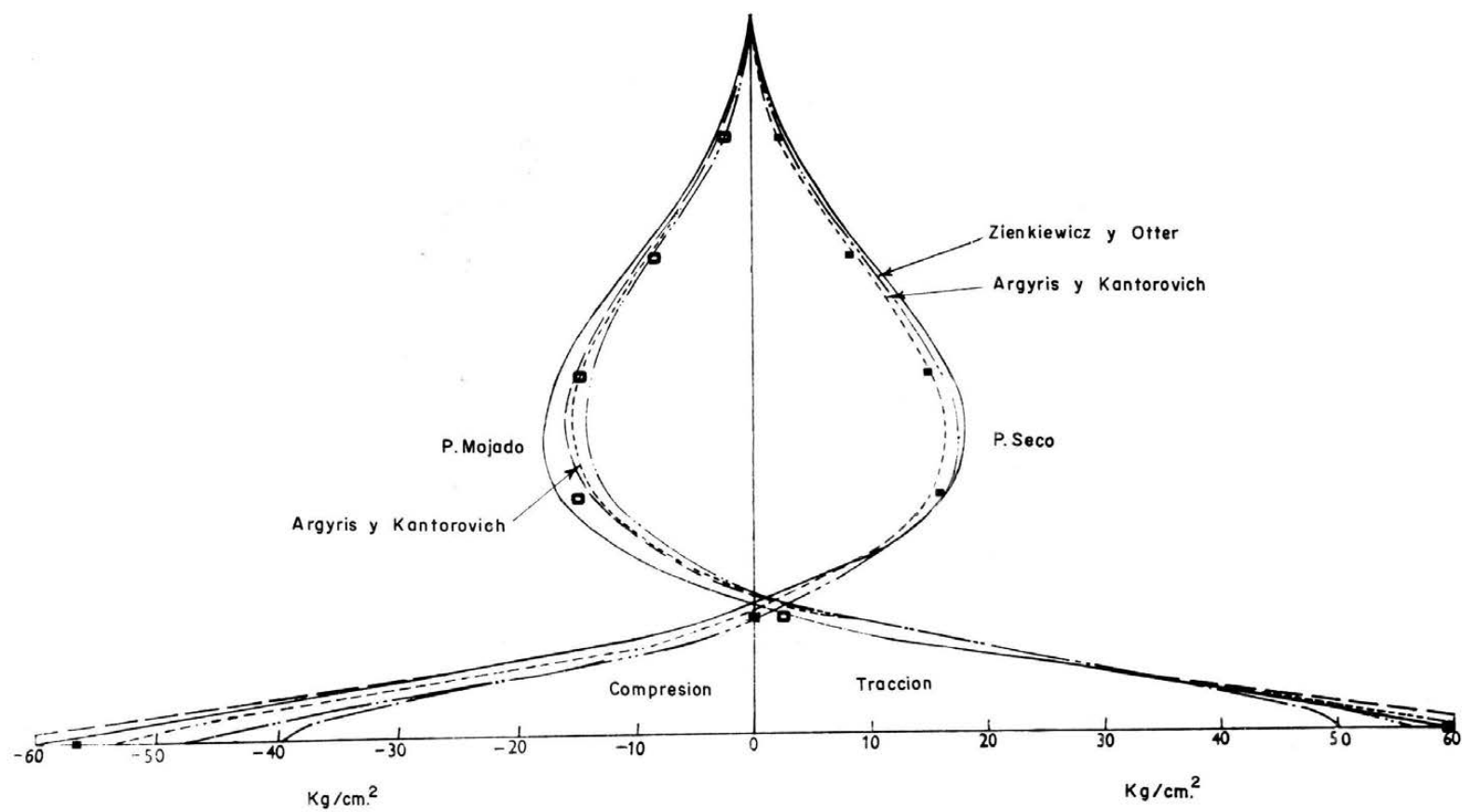


Fig. 6. Presa tipo 1: tensiones verticales en ménsula central.

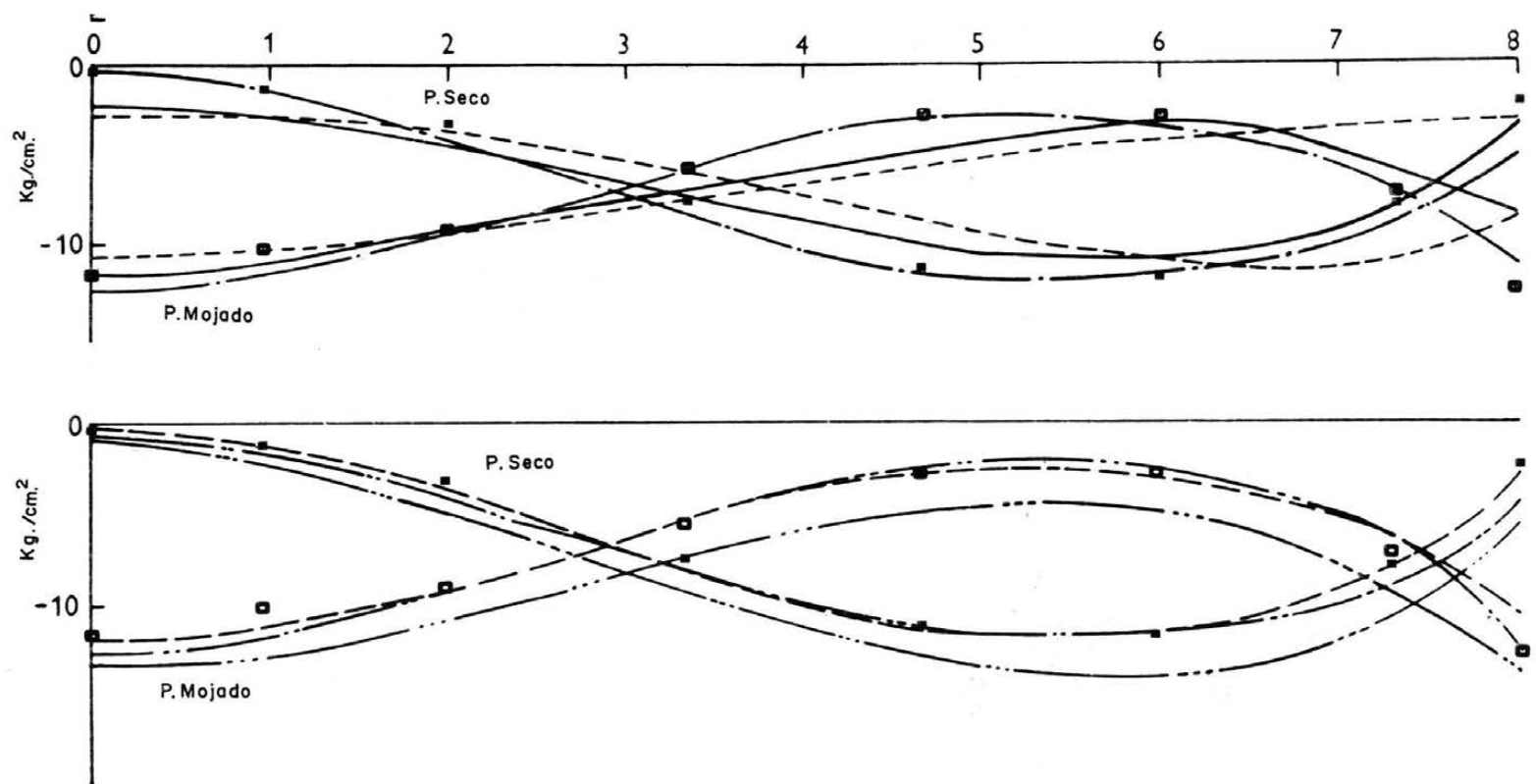


Fig. 7. Presa tipo 1: tensiones de arco en el arco superior (coronación).

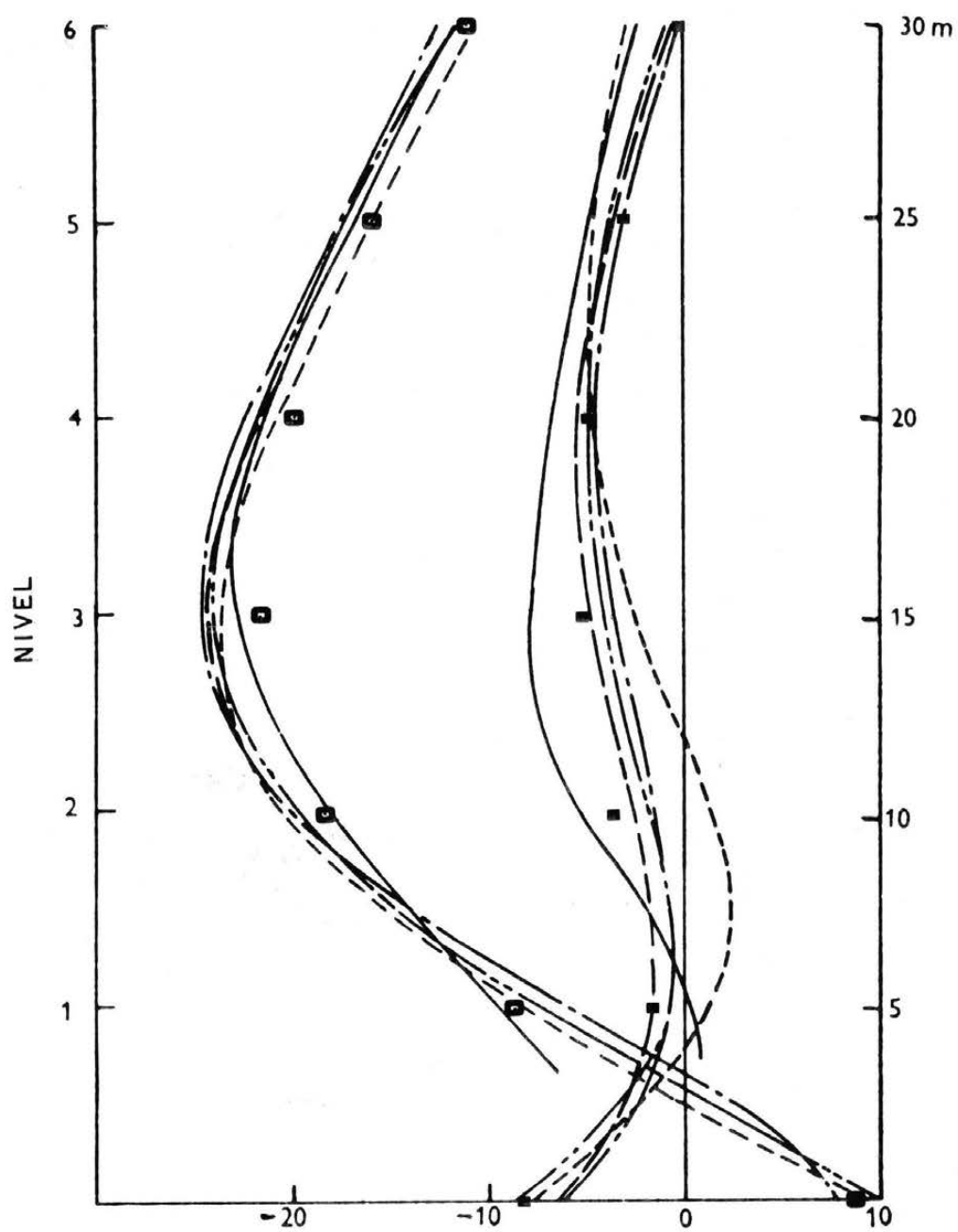


Fig. 8. Presa tipo 1: tensiones de arco en ménsula central.

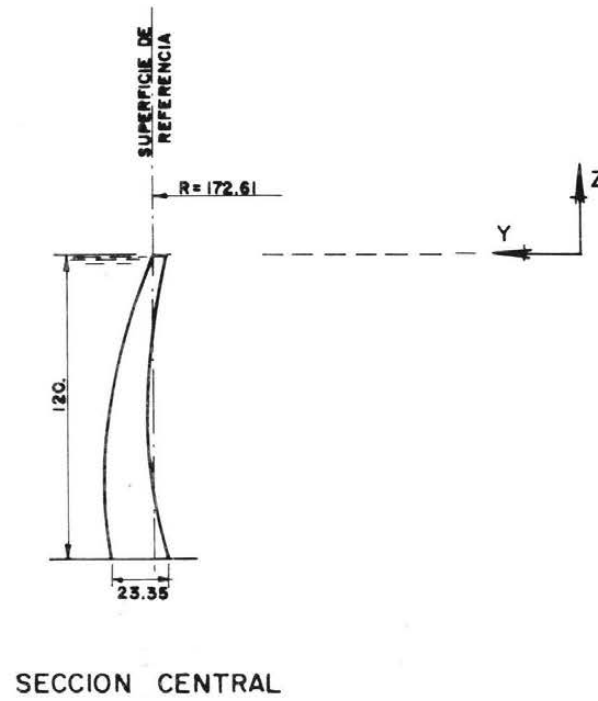
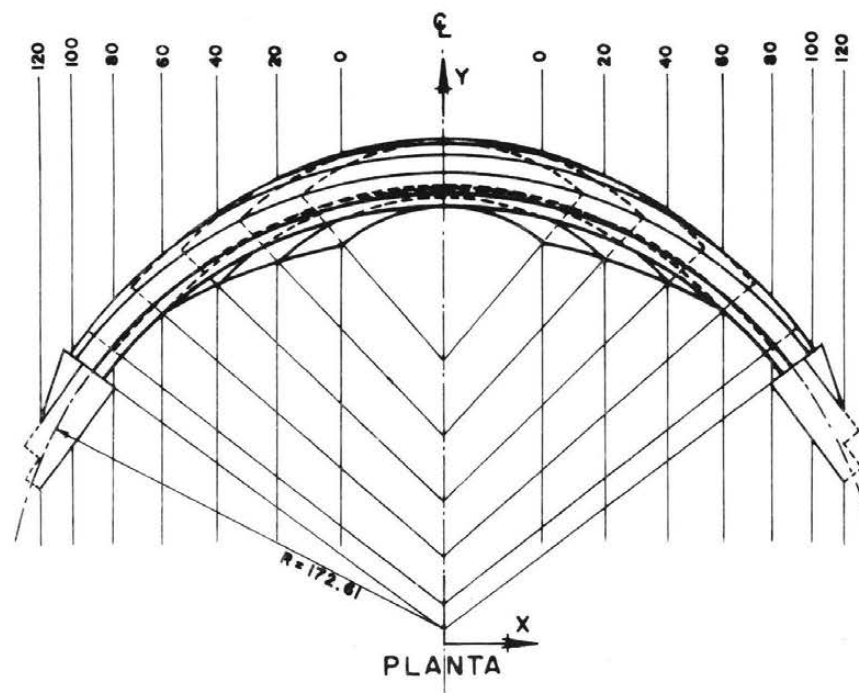


Fig. 9. Presa tipo 2: Planta y sección de la ménsula central.

Presa tipo 2.—Esta es una presa de doble curvatura sobre un valle semejante al tipo anterior. La altura desde el valle a la coronación es de 120 mts. Como anteriormente, se suponen terreno y estribos infinitamente rígidos. La fig. 9 representa una planta de la presa. El emparrillado de cálculo adoptado se representa en la figura 10.

La entrada de datos de las características geométricas del emparrillado ha sido:

N.º nudos = 49

N.º arcos = 7

N.º ménsulas = 8

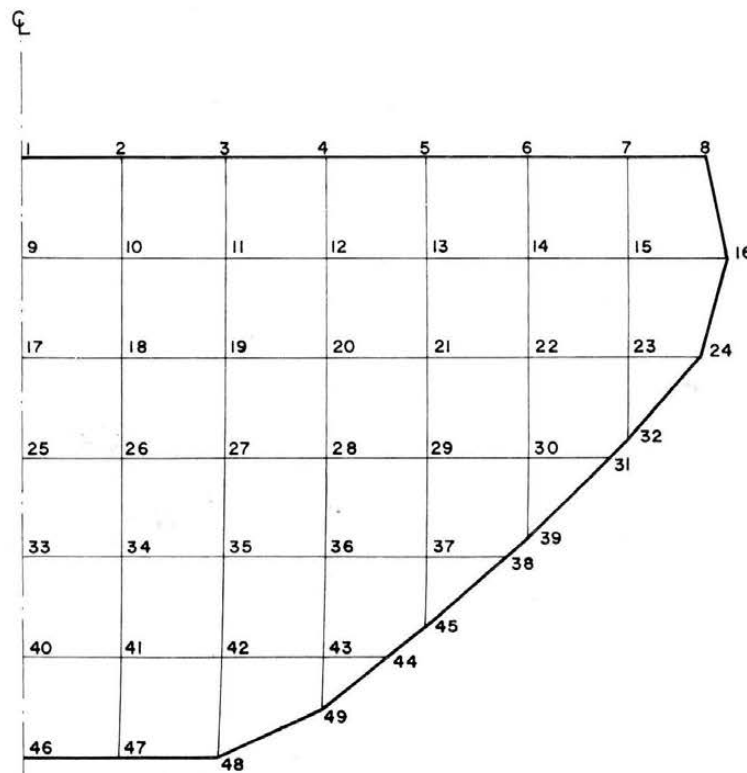


Fig. 10. Presa tipo 2: Emparrillado equivalente de cálculo en proyección sobre el plano XZ.

Coordenadas de los nudos y cosenos directores de la normal exterior (*). Tabla 2.

Descripción de los arcos del emparrillado.

Arco 1:	Nudos:	1	—	2	—	3	—	4	—	5	—	6	—	7	—	8
” 2:	” :	9	—	10	—	11	—	12	—	13	—	14	—	15	—	16
” 3:	” :	17	—	18	—	19	—	20	—	21	—	22	—	23	—	24
” 4:	” :	25	—	26	—	27	—	28	—	29	—	30	—	31		
” 5:	” :	33	—	34	—	35	—	36	—	37	—	38				
” 6:	” :	40	—	41	—	42	—	43	—	44						
” 7:	” :	46	—	47	—	48										

Descripción de las ménsulas del emparrillado.

Ménsula 1:	Nudos:	1	—	9	—	17	—	25	—	33	—	40	—	46
” 2:	” :	2	—	10	—	18	—	26	—	34	—	41	—	47
” 3:	” :	3	—	11	—	19	—	27	—	35	—	42	—	48
” 4:	” :	4	—	12	—	20	—	28	—	36	—	43	—	49
” 5:	” :	5	—	13	—	21	—	29	—	37	—	45		
” 6:	” :	6	—	14	—	22	—	30	—	39				
” 7:	” :	7	—	15	—	23	—	32						
” 8:	” :	8	—	16	—	24								

Los resultados de corrimientos y tensiones se representan en las figs. 11 a 16

Fig. 11.- Representa los corrimientos radiales de la superficie media en la ménsula central. La notación indicada para otros métodos de cálculo es la misma en los restantes gráficos.

Fig. 12.- Representa los corrimientos radiales de la superficie media en el arco superior (coronación) sobre el desarrollo de dicha superficie.

Fig. 13.- Representa los corrimientos tangenciales de la superficie media en el arco superior (coronación).

Fig. 14.- Representa las tensiones verticales (tensiones de ménsula) en ambos paramentos de la ménsula central.

(*). Datos obtenidos del programa “Geometría de presas bóveda” elaborado en el Laboratorio Central.

TABLE 2

Nudo	x	y	z	α	β	γ
1	0.	169.937	0.	0.	0.94045	0.32872
2	19.995	168.756	0.	0.11065	0.93392	0.32872
3	39.990	165.165	0.	0.22131	0.91404	0.32872
4	59.985	158.998	0.	0.33196	0.87991	0.32872
5	79.979	149.939	0.	0.44261	0.82978	0.32872
6	99.974	137.418	0.	0.55327	0.76049	0.32872
7	119.969	120.358	0.	0.66392	0.66607	0.32872
8	135.715	102.273	0.	0.75107	0.56599	0.32872
9	0.	176.062	-20.	0.	0.96485	0.24897
10	19.986	174.924	-20.	0.10953	0.95862	0.24897
11	39.972	171.464	-20.	0.21905	0.93966	0.24897
12	59.958	165.538	-20.	0.32858	0.90718	0.24897
13	79.944	156.866	-20.	0.43810	0.85965	0.24897
14	99.930	144.954	-20.	0.54763	0.79438	0.24897
15	119.916	128.911	-20.	0.65716	0.70645	0.24897
16	140.605	105.965	-20.	0.77053	0.58071	0.24897
17	0.	180.337	-40.	0.	0.98327	0.16361
18	19.971	179.166	-40.	0.11501	0.97737	0.15836
19	39.942	175.603	-40.	0.23058	0.95921	0.14230
20	59.912	169.490	-40.	0.34712	0.92726	0.11448
21	79.884	160.516	-40.	0.46463	0.87867	0.07319
22	99.855	148.128	-40.	0.58227	0.80867	0.01562
23	119.825	131.288	-40.	0.69744	0.70917	-0.06276
24	134.655	114.669	-40.	0.77771	0.60772	-0.13903
25	0.	182.762	-60.	0.	0.99446	0.07417
26	19.942	181.469	-60.	0.12852	0.98672	0.06563
27	39.885	177.521	-60.	0.25740	0.96260	0.03951
28	59.828	170.699	-60.	0.38640	0.91927	-0.00579
29	79.770	160.559	-60.	0.51383	0.85153	-0.07299
30	99.713	146.246	-60.	0.63512	0.75085	-0.16600
31	116.524	129.661	-60.	0.72510	0.63035	-0.26845
32	119.852	127.219	-56.60	0.73356	0.62637	-0.25392
33	0.	183.337	-80.	0.	0.99757	-0.01737
34	19.887	181.840	-80.	0.14932	0.98601	-0.03098
35	39.775	177.241	-80.	0.29800	0.94943	-0.07264
36	59.662	169.183	-80.	0.44348	0.88207	-0.14462
37	79.550	156.880	-80.	0.57867	0.77373	-0.24997
38	95.540	142.783	-80.	0.66960	0.64665	-0.36062
39	99.750	140.446	-76.20	0.68169	0.64542	-0.33913
40	0.	182.062	-100.	0.	0.99230	-0.10876
41	19.755	180.202	-100.	0.18464	0.97213	-0.13190
42	39.510	174.413	-100.	0.36482	0.90698	-0.20245
43	59.265	163.920	-100.	0.52908	0.78318	-0.32220
44	72.195	153.630	-100.	0.61587	0.66062	-0.42646
45	79.576	150.565	-93.80	0.63276	0.65697	-0.40656
46	0.	178.937	-120.	0.	0.97896	-0.19771
47	19.283	176.357	-120.	0.25418	0.93284	-0.25054
48	38.566	167.979	-120.	0.47995	0.77643	-0.40605
49	59.222	158.255	-110.60	0.58514	0.66360	-0.46401

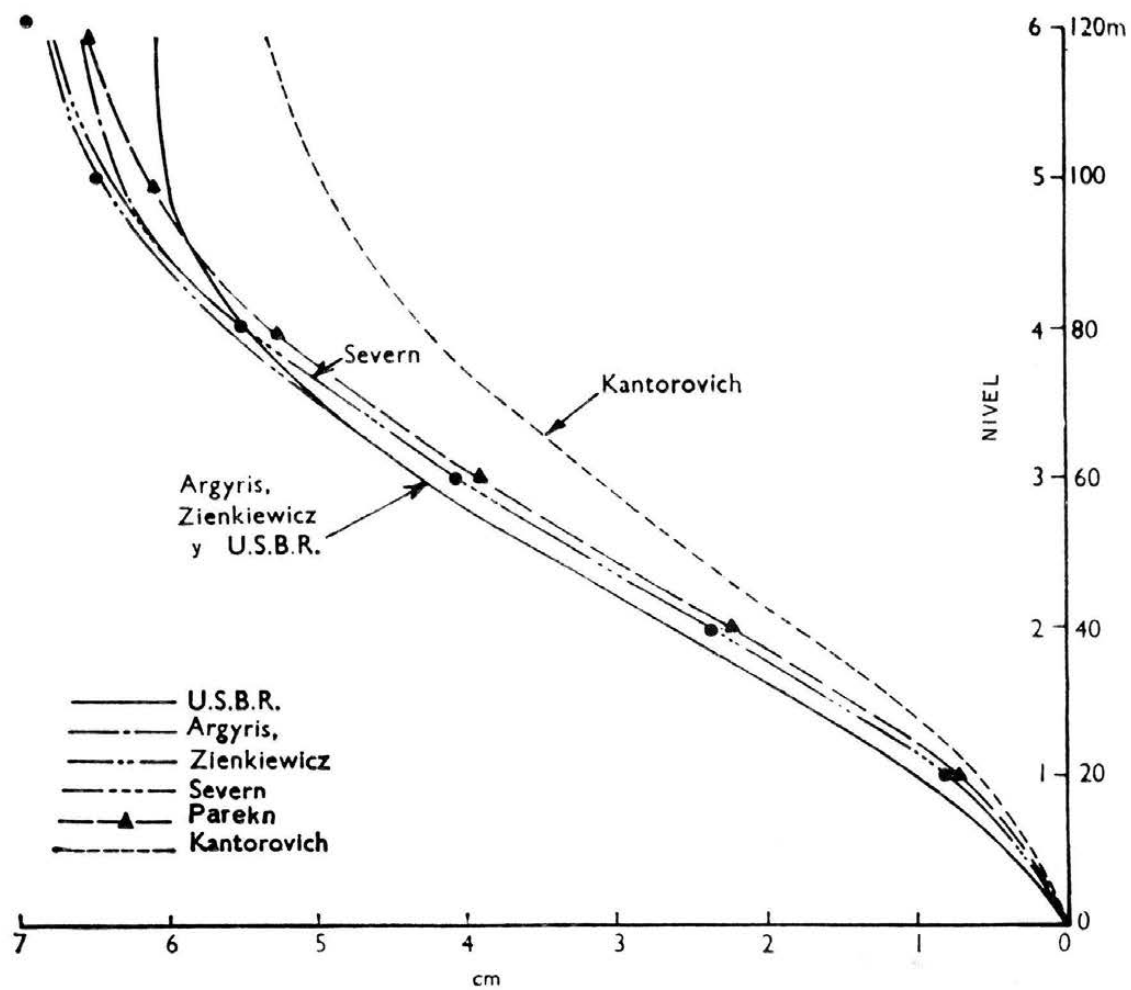


Fig. 11. Presa tipo 2: corrimientos radiales en ménsula central.

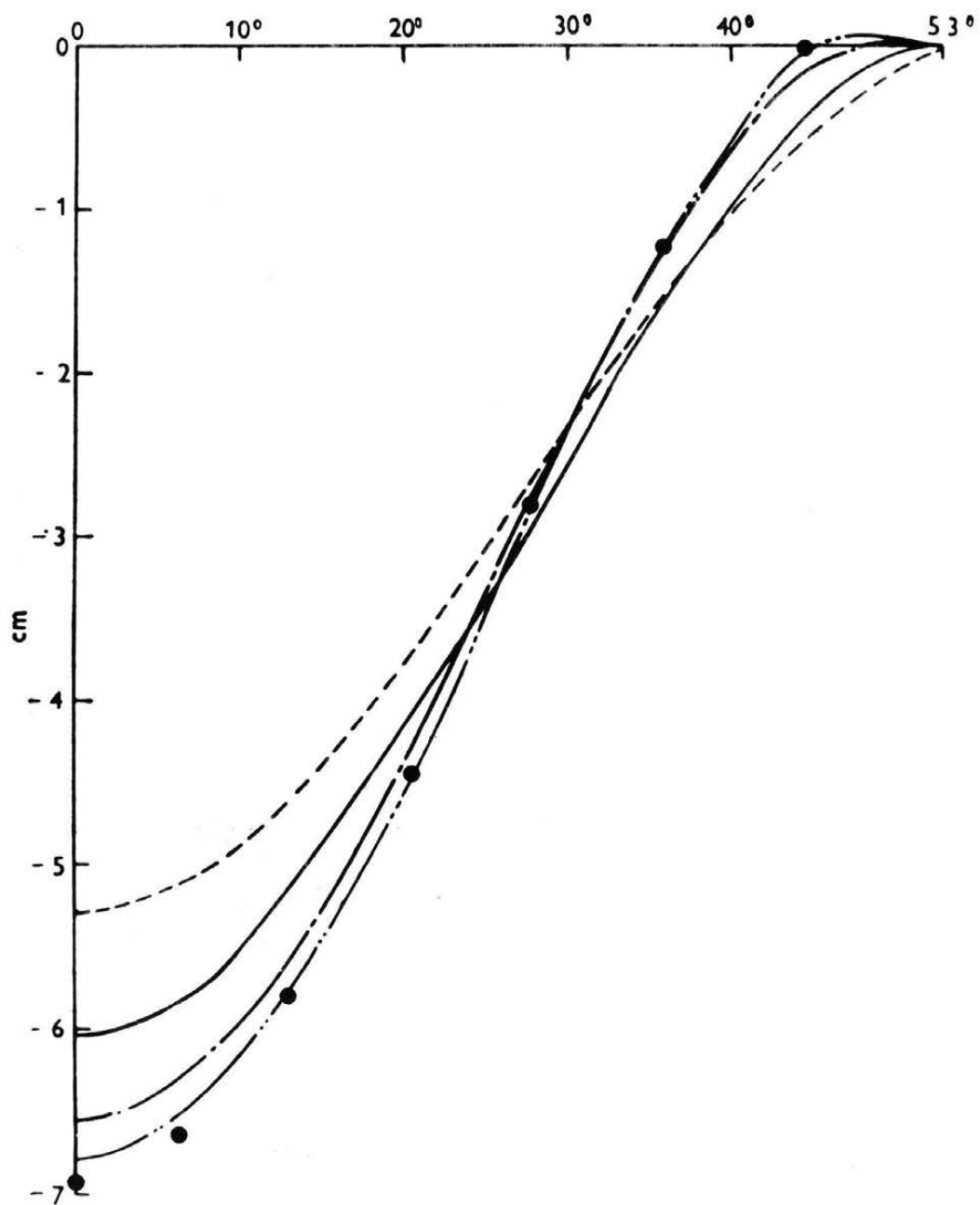


Fig. 12. Presa tipo 2: corrimientos radiales en arco superior (coronación).

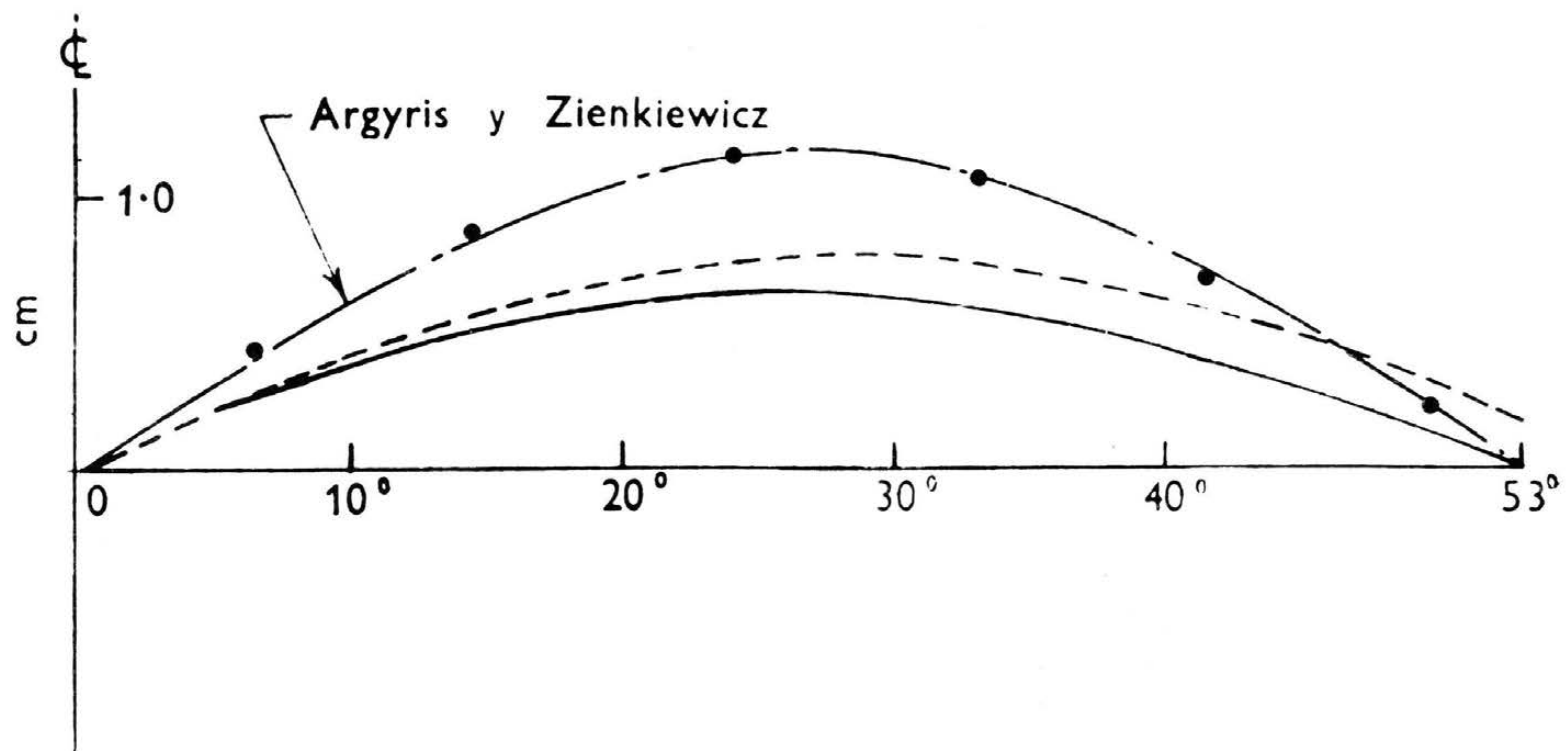


Fig. 13. Presa tipo 2: corrimientos tangenciales en arco superior (coronación).

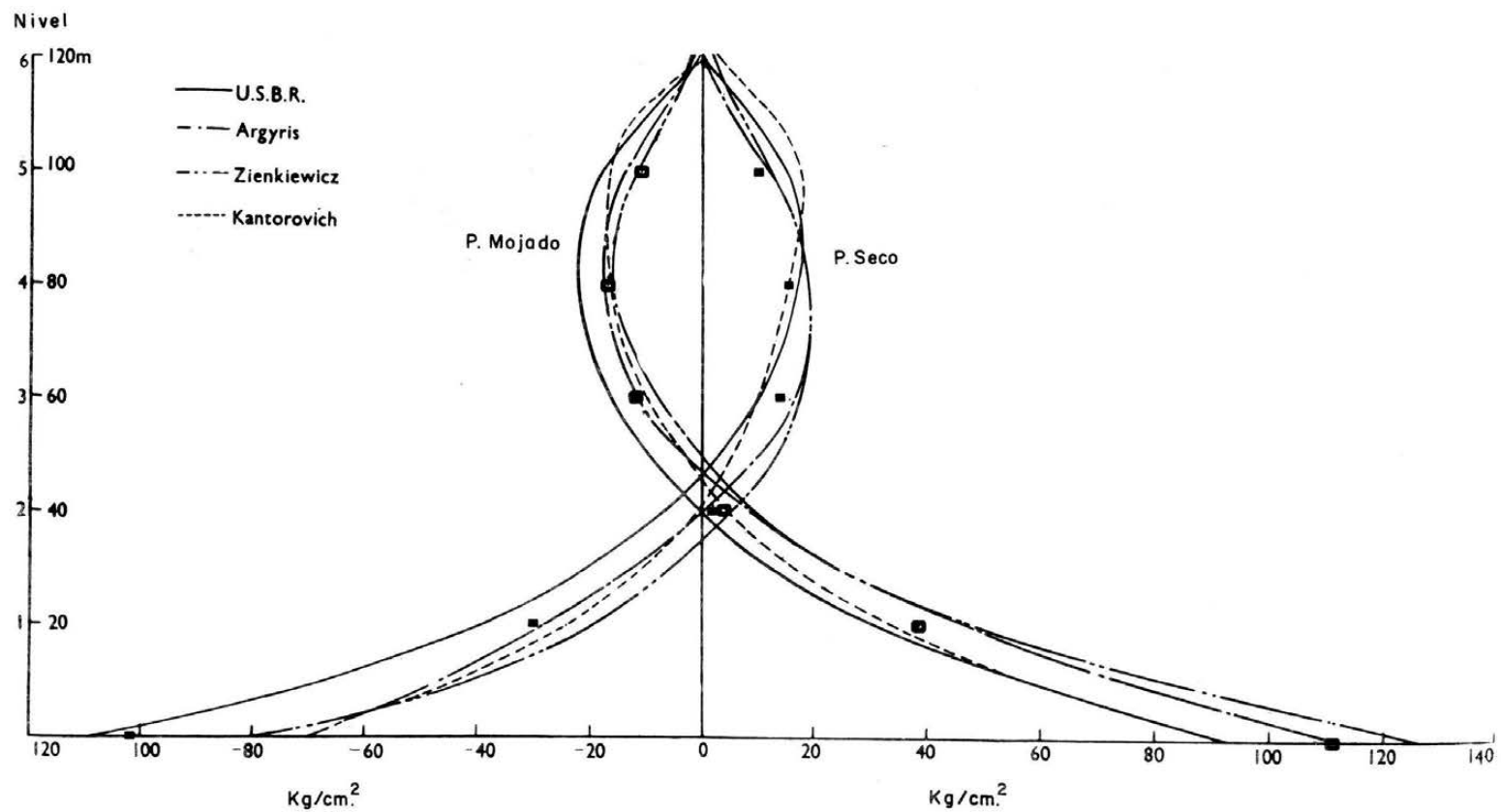


Fig. 14. Presa tipo 2: tensiones verticales en ménsula central.

Fig. 15.- Representa las tensiones horizontales (tensiones de arco) en ambos paramentos del arco superior (coronación).

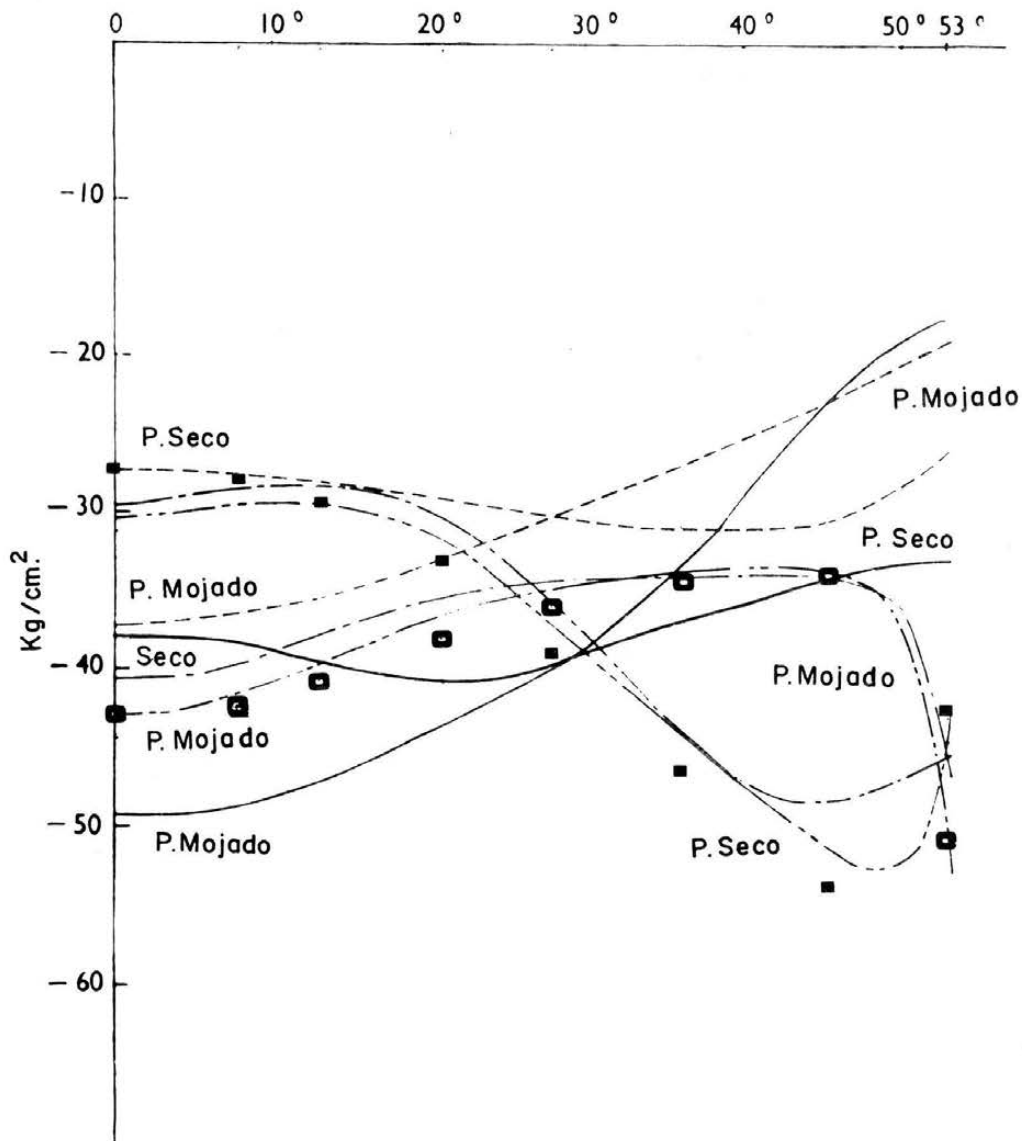


Fig. 15. Presa tipo 2: Tensiones de arco en el arco superior (coronación).

Fig. 16. Representa las tensiones horizontales en ambos paramentos de la ménsula central. Las tensiones en el pie de la ménsula se han obtenido a partir de las verticales multiplicadas por el módulo de Poisson.

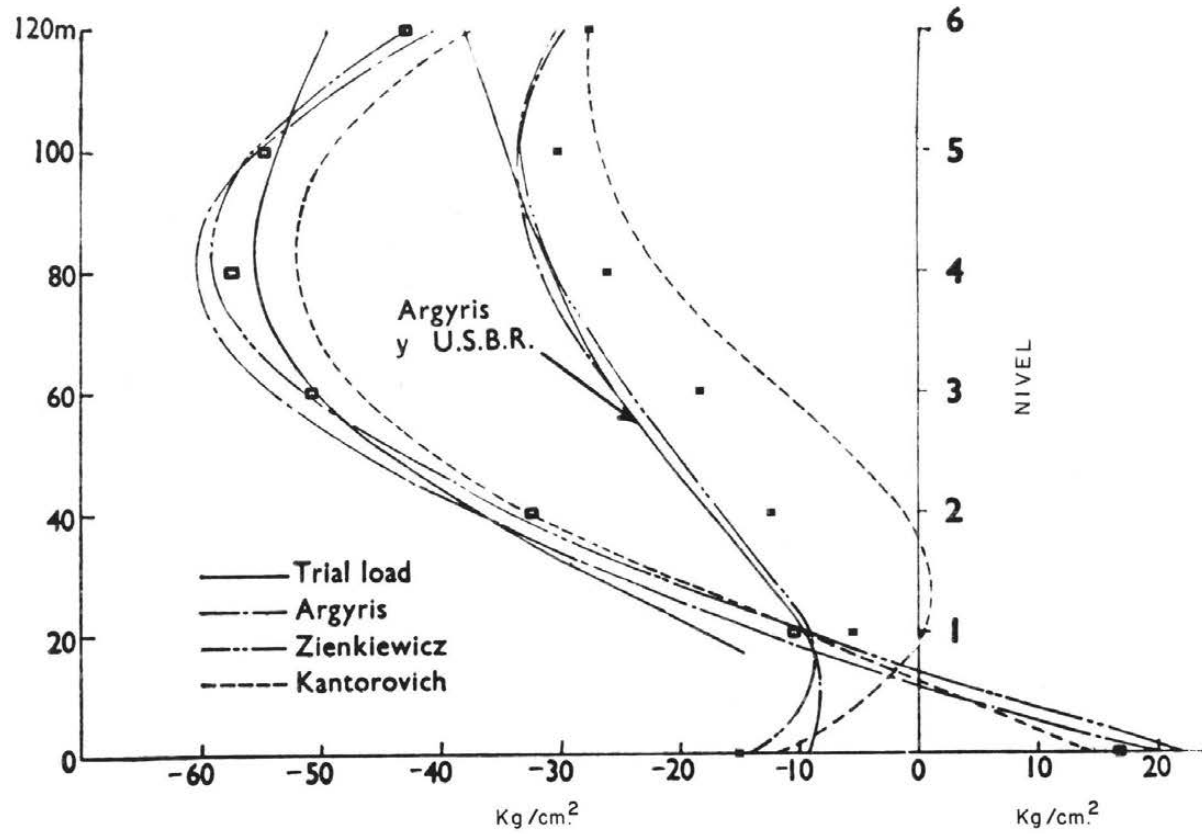


Fig. 16. Presa tipo 2: tensiones de arco en ménsula central.

5.- Conclusiones

De las pruebas realizadas con este método se deduce que la aproximación obtenida en los resultados aumenta con el número de nudos del entramado de cálculo adoptado. También aumenta con la ortogonalidad de dicho entramado.

Como se puede observar de los resultados de los dos ejemplos tratados, el método se aproxima especialmente a los de elementos finitos (Argyris y Zienkiewicz) y en general se mantiene entre los demás métodos comparados, por lo que se puede considerar muy satisfactorio. La mayor ventaja del método reside en la economía del mismo. En una presa normal de 125 nudos y seis hipótesis de carga, el tiempo de proceso en un ordenador medio, ejemplo IBM-1130 de 32 K, puede ser evaluado en un máximo de 4 horas, siendo mínima la intervención del calculista.

6. Reconocimientos

Los autores desean agradecer la ayuda en la prestada en este artículo, a su compañero, el Ingeniero de Caminos D. José María de la Peña.

El permiso para la reproducción de las figuras de la referencia [1] es también gratamente reconocida a la Institution of Civil Engineers of London.

B I B L I O G R A F I A

- (1) – “Arch Dams”, Proceedings of the Symposium held at the Institution of Civil Engineers, 20-21 March 1968”.
- (2) – “Automatic Design of Shell Structures”, P. G. Smith and E. L. Wilson. Journal of the Struc. División ASCE. Vol. 97 No ST 1 Jan 1971.
- (3) – “Matrix Methods of Structural Analysis”, R. K. Livesley. Pergamon Press.

RESUMEN

El objeto de esta publicación es presentar un método para el cálculo de presas bóveda. El método consta de las siguientes partes fundamentalmente:

- 1) Sustitución de la estructura continua por una estructura entramado espacial formada por nudos (sobre la superficie media) y barras rectas.
- 2) Determinación de las características mecánicas de las barras.
- 3) Aplicación de las cargas en los nudos.
- 4) Cálculo del entramado espacial por procedimientos matriciales (método de equilibrio o matriz de rigidez).

Presenta la ventaja de utilizar programas standard de cálculo de estructuras (STRESS, BAUSTATIK, etc.) de donde resulta una gran economía. Es aconsejable realizar programas adicionales sencillos para entrada de datos del emparrillado y obtención de resultados en tensiones y tensiones principales. Finalmente se comparan los resultados obtenidos con el método en las presas tipos 1 y 5 de CIRIA con otros métodos de cálculo de presas bóveda.

Résumé

Cette publication a pour objet présenter une méthode pour le calcul des barrages voûte. Cette méthode se compose des parties suivantes, fondamentalement:

- 1) Substitution de la structure continue par une structure grillage spatial formée par noeuds (situés sur la surface moyenne) et barres droites.
- 2) Détermination des caractéristiques mécaniques des barres.
- 3) Application des charges aux noeuds.
- 4) Calcul du grillage spatial par des procédés matriciels (méthode d'équilibre ou de la matrice de rigidité).

Il présente l'avantage d'utiliser des programmes standard de calcul de structures (STRESS, BAUSTATIK, etc...), d'où il en ressort une considérable économie. Il est recommandable de réaliser au préalable des programmes additionnels simples pour l'entrée des données du grillage et pour l'obtention des résultats sous forme de tensions et de tensions principales. Finalement on compare les résultats obtenus par cette méthode dans les barrages type 1 et 5 du CIRIA avec d'autres méthodes de calcul de barrages voûte.

SUMMARY

This publication presents a method of calculus for arch dams. The method is composed of the following steps:

- 1) Substitution of the continuous structure by a spatial frame formed by joints (situated on the middle surface) and straight members.
- 2) Determination of the member mechanical properties.
- 3) Application of the loads in the joints.
- 4) Calculation of the space frame by matrix methods (equilibrium method or stiffness matrix).

This method has the advantage of using available standard programs of calculus (STRESS, BAUSTATIK, etc...) from which results a great economy. It is advisable to prepare additional simple programs for the input data of the frame and for obtaining the results of stresses and principal stresses. Finally the results obtained by this method in the CIRIA arch dams type 1 and 5 are compared with those obtained by other methods of calculus of arch dams.